文章编号:1000-4939(2023)05-1117-08

冷弯薄壁型钢与轻骨料混凝土黏结性能研究

牛建刚,王敬淞,边钰,李京军

(内蒙古科技大学土木工程学院,014010 包头)

摘 要:为研究冷弯薄壁型钢与轻骨料混凝土间的界面黏结性能和磷酸镁水泥(MPC)作为界面黏结剂的可行性,为今后组合结构中增强界面黏结强度的研究提供参考。通过 8 组试件的推出试验,对其破坏现象、荷载-滑移曲线、界面黏结能量指标及界面损伤进行分析。结果表明:试件的开裂荷载、峰值荷载和残余承载力均会随纤维的掺入而增加;黏结界面涂抹 MPC 后,黏结承载力会进一步提高,荷载-滑移曲线对应的屈服平台变得更明显。MPC 的应用对试件黏结能量指标的提高幅度要大于纤维的作用,其中对弹性变形能的提高幅度更为明显,使试件达到破坏状态的速度大幅延缓,并对加载全程的损伤发展都起到抑制作用,将其应用在 LC30 级轻骨料混凝土和钢纤维轻骨料混凝土中会取得更好的效果。

关键词:冷弯薄壁型钢;轻骨料混凝土;界面黏结性能;磷酸镁水泥;界面损伤

中图分类号:TU398 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.05.017

Study on bond behavior of cold-formed thin-walled steel and lightweight aggregate concrete

NIU Jiangang, WANG Jingsong, BIAN Yu, LI Jingjun

(College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, 014010 Baotou, China)

Abstract: In order to investigate the interfacial bond behavior between cold-formed thin-walled steel and fiber reinforced lightweight aggregate concrete and the feasibility of using magnesium phosphate cement (MPC) as interfacial binder, it provides a reference for the future research on enhancing the interfacial bonding strength of composite structure. Through the push-out tests of 8 groups of specimens, the failure phenomenon, load-slip curve, interfacial bond energy index and interfacial damage were analyzed. The test results show that the cracking load, peak load and residual bearing capacity of the specimen will increase with the addition of fiber; after the bond interface is smeared with MPC, the bond bearing capacity will be further increased, and the yield platform corresponding to the load-slip curve becomes more obvious. The application of MPC has a greater effect on the bond energy index of the specimen than that of fiber, in which the increase of elastic deformation energy is more obvious, which greatly delays the speed of the specimen reaching the failure state, and restrains the damage development of the whole loading process.

收稿日期: 2020-11-24 修回日期:2021-12-11
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51368042;51968008)
通信作者:牛建刚,教授。E-mail: niujiangang@imust.edu.cn
引用格式:牛建刚,王敬淞,边钰,等. 冷弯薄壁型钢与轻骨料混凝土黏结性能研究[J]. 应用力学学报,2023,40(5):1117-1124.
NIU Jiangang, WANG Jingsong, BIAN Yu, et al. Study on bond behavior of cold-formed thin-walled steel and lightweight aggregate concrete [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(5):1117-1124.

The application of MPC in LC30 lightweight aggregate concrete and steel fiber lightweight aggregate concrete will achieve better results.

Key words: cold-formed thin-walled steel; lightweight aggregate concrete; interfacial bond behavior; magnesium phosphate cement; interfacial damage

随着传统建造模式的转型升级,冷弯薄壁型钢结构体系已广泛应用于轻型装配式钢结构房屋领域。为了使冷弯薄壁型钢轻质的特点得到充分发挥,并抑制型材易屈曲、延性低的缺点[1],部分学者开始对冷弯薄壁型钢-轻骨料混凝土组合结构进行研究。

为了保证两种材料的协同工作能力并解决轻骨料混凝土脆性破坏特征的问题,可将纤维掺入轻骨料混凝土中,形成冷弯薄壁型钢-纤维轻骨料混凝土结构。因此两种材料的界面黏结性能就成了保证二者共同工作的前提,但目前关于冷弯薄壁型钢与纤维轻骨料混凝土界面黏结性能的研究却十分匮乏。根据已有研究发现,型钢混凝土组合结构在加载时会因过量的黏结滑移而导致结构过早破坏,使两种材料的性能不能充分发挥[2-3]。

磷酸镁水泥(MPC)是一种新型气硬性胶凝材料,具有快硬早强、黏结强度高、体积变形小等特点[4],使其作为一种新型的无机胶凝剂和修补材料在土木工程领域得到应用。根据已有研究发现:MPC 与既有混凝土之间有良好的黏结性能,二者早期的黏结强度即可达 6.1 MPa[5];MPC 与 Q235 钢间的黏结强度可达(4.6 ± 0.7)MPa[6],但是将 MPC 作为一种界面黏结剂应用在型钢与混凝土界面上的研究几乎处于空白。

因此本研究通过 8 组试件的推出试验,研究冷弯薄壁型钢与纤维轻骨料混凝土的界面黏结性能,对比分析塑钢纤维和钢纤维对其界面黏结性能的影响;并将 MPC 作为新型界面黏结剂应用在试件中,以研究 MPC 是否可以作为一种高效黏结剂应用到型钢与混凝土组合结构中,将为今后组合结构中增强界面黏结强度的研究提供参考,对装配式组合结构具有一定的实践意义和参考价值。

1 试验概况

1.1 试件设计与材料属性

本研究参照文献[7]共设计了 8 组标准推出试件,试件截面尺寸为 240 mm × 160 mm,型钢采用统一规格 Q235 级型号为 C120 × 50 × 20 × 2.5 的冷弯薄壁 C 型钢,型钢黏结界面长度均为 220 mm,型钢超出黏结界面长度 30 mm 以便型钢推出,并在型钢露出部位的翼缘间焊接缀条以防止加载时该处过早发生屈曲,试件截面尺寸及配筋见图 1。

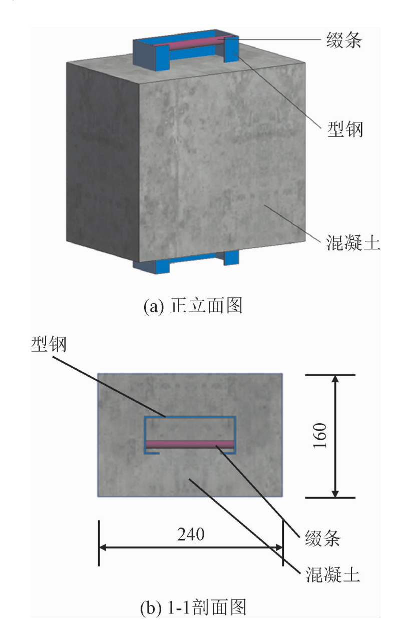


图 1 试件截面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the cross-section of the test piece

本试验采用 LC30 和 LC40 轻骨料混凝土,混凝土配合比及基本力学性能见表 1,其中不同强度的混凝土采用的水泥等级均一致。

塑钢纤维采用波浪形改性聚丙烯粗纤维,其长度为 30 mm,直径为 0.8 mm,抗拉强度为 530 MPa,弹性模量为 9 884 MPa,如图 2 所示;钢纤维采用端钩型钢纤维,其长度为 30 mm,直径为 1 mm,抗拉强度为 1 100 MPa,弹性模量为 2×10^5 MPa,如图 3 所示,试件中两种纤维的体积掺量均为 0.6%。磷酸镁水泥(MPC)采用贵州磷镁材料有限公司生产的超早强型(U)磷酸镁水泥,其 1 h 抗压强度即可达 40 MPa以上。试验时将预先搅拌好的 MPC 净浆在混凝土浇筑前几分钟内均匀涂抹在黏结界面处,净浆厚度应达 2 mm。

表 1　轻骨料混凝土配合比及基本力学性能

Tab. 1　The mix ratio and basic mechanical properties of lightweight aggregate concrete

设计强度等级	纤维种类	纤维掺量/(kg·m^{-3})	水/(kg·m^{-3})	水泥/(kg·m^{-3})	河砂/(kg·m^{-3})	碎石型页岩陶粒/(kg·m^{-3})	减水剂/(kg·m^{-3})	立方体抗压强度f_{cu}/MPa
LC30	–	0	172	430	638	475	6.32	31.2
LC30	塑钢纤维	6	172	430	638	475	6.32	33.4
LC30	钢纤维	50	172	430	638	475	6.32	35.2
LC40	塑钢纤维	6	189	473	585	586	7.1	42.75
LC40	钢纤维	50	189	473	585	586	7.1	42.62

注:塑钢纤维与钢纤维的体积掺量一致,均为 0.6%。



图 2　塑钢纤维

Fig. 2　Plastic steel fiber



图 3　钢纤维

Fig. 3　Steel fiber

表 2 给出了所有试件的设计参数,试件编号前两个字母表示纤维种类:NF、PF、SF 分别代表不掺纤维、掺塑钢纤维、掺钢纤维;编号中的数字代表混凝土强度;最后一个字母代表黏结界面是否涂抹 MPC(N 代表界面没有涂抹 MPC,M 代表界面涂抹 MPC)。

表 2　试件设计参数

Tab. 2　Specimen design parameters

试件编号	混凝土强度等级	纤维种类	界面黏结剂
NF30-N	LC30	未掺纤维	未涂抹
PF30-N	LC30	掺塑钢纤维	未涂抹
SF30-N	LC30	掺钢纤维	未涂抹
NF30-M	LC30	未掺纤维	涂抹 MPC
PF30-M	LC30	掺塑钢纤维	涂抹 MPC
SF30-M	LC30	掺钢纤维	涂抹 MPC
PF40-M	LC40	掺塑钢纤维	涂抹 MPC
SF40-M	LC40	掺钢纤维	涂抹 MPC

1.2　试验加载与量测

加载前将型钢加载端进行打磨并在型钢上垫一层铜板,如图 4 所示。试件在 200 t 液压式压力试验机上进行加载,加载过程中,试件上端固定不动,下端按每级 5 kN 逐级匀速加载,当滑移值达到 15 mm 或荷载衰减至恒定时停止加载。将位移传感计固定在加载板与铜板之间以量测冷弯薄壁型钢与混凝土之间的滑移值。

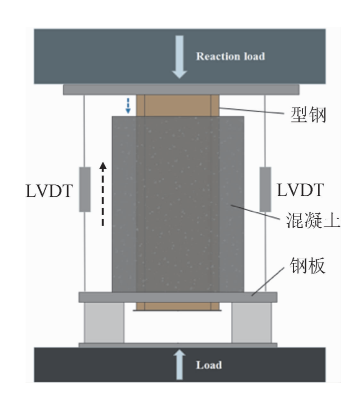


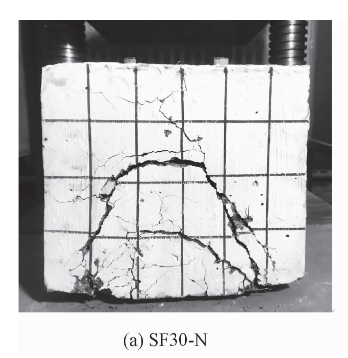
图 4　试验加载装置图

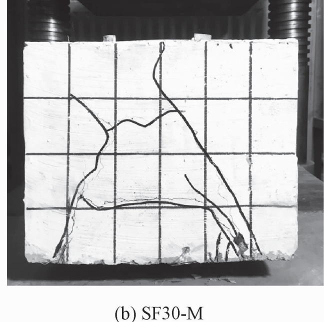
Fig. 4　Diagram of test loading device

2 试验结果及分析

2.1 破坏现象

试件在加载初期,冷弯薄壁型钢与轻骨料混凝土间产生较小的相对滑移,在界面处涂抹 MPC 也不能改变这一现象,这是因为冷弯薄壁型材与水泥胶体间的化学胶结力较小的缘故所致。当荷载加至峰值荷载的 40% ~60% 时试件裂缝自型钢翼缘处沿黏结长度斜向发展,未掺纤维的试件由于缺少纤维的约束,裂缝一经开展便形成了贯通斜裂缝。随着加荷的持续,未涂 MPC 的试件在滑移值为 1.3 ~ 1.71 mm 时达到峰值荷载,界面处涂抹 MPC 的试件会在滑移值为 2.05 ~3.66 mm 时达到峰值荷载,这是因为 MPC 会因收缩应变而产生微膨胀现象,这非常有利于约束条件下的界面黏结[8]。峰值荷载后荷载开始下降,随着型钢持续被推出,未涂 MPC 的试件加载端出现局部压碎现象,涂抹 MPC 的试件加载端混凝土出现剥落现象。试验结束后发现:当界面涂有 MPC 时,型钢腹板被推出的部分会裹挟有大量混凝土翼缘表面摩擦痕迹明显,部分试件的破坏形态见图 5。


(a) SF30-N


(b) SF30-M



(c) SF30-M型钢推出部位

图 5 试件的破坏形态

Fig. 5 The failure form of the specimen

2.2 荷载-滑移曲线

图 6 为各组试件的实测荷载滑移曲线,表 3 列出了根据曲线所得到相关特征值,P_c、P_u、P_r 分别代表开裂荷载、峰值荷载、残余承载力,与各承载力相对应的界面黏结应力分别是 τ_c、τ_u、τ_r。

根据图 6(a)和表 3 可以发现:混凝土中掺入纤维后,由于纤维对混凝土的约束作用,试件的开裂荷载、峰值荷载和残余承载力均有大幅提升,其中塑钢纤维对试件黏结承载力的提升幅度更高。对于掺有钢纤维的试件 SF30-N、SF30-M,虽然其残余承载力有所提升,但其相对残余强度 P_r/P_u 分别为 57.26% 和 48.29%,其值低于 PF30-N 的 72.31% 与 PF30-M 的 65.16%。这是因为塑钢纤维具有憎水性,而钢纤维具有亲水性,这就导致试件掺有钢纤维时,其黏结界面处的水灰比更高,水灰比越高,界面黏结强度越低[9]。对于黏结界面涂抹 MPC 的试件而言,其荷载-滑移曲线对应的屈服平台变得更为明显,峰值荷载对应的滑移值增加,但初始阶段的弹性黏结刚度会有小幅度减小。同时,MPC 能使黏结界面处混凝土的水化更加充分并能与部分未水化的熟料颗粒反应生成胶凝性的水化产物[10],增强了混凝土与型钢之间的摩擦阻力与机械咬合力[5],使试件 NF30-M、PF30-M、SF30-M 较未涂抹 MPC 试件的峰值荷载提高了 16.94%、25.13%、32.46%,残余荷载提高了 61.9%、12.05%、12.75%。相较于试件 PF30-M,MPC 应用在掺有钢纤维的试件 SF30-M 中会取得更好的效果。

根据图 6(b)和表 3 可以发现:混凝土强度提高使其脆性增强,最终导致试件的开裂荷载和峰值荷载均有不同程度的降低,但初始阶段的弹性黏结刚度会有小幅增加。对于试件 PF40-M 和 SF40-M 而言,其峰值荷载后的刚度退化较慢,相对残余强度 P_r/P_u 分别为 62.83% 和 68.65%,根据分析可以发现 MPC 作为界面黏结剂应用在 LC30 级试件里将取得更好的效果。

表 3　试件黏结强度特征值

Tab. 3　Characteristic values of bond strength of specimens

试件编号	P_c/kN	τ_c/MPa	P_u/kN	τ_u/MPa	P_r/kN	τ_r/MPa
NF30-N	34.65	0.56	72.13	1.16	43.23	0.70
PF30-N	66.15	1.07	100.9	1.63	72.95	1.18
SF30-N	72.48	1.17	92.28	1.49	52.68	0.85
NF30-M	49.35	0.80	84.35	1.36	70.01	1.13
PF30-M	68.45	1.10	126.2	2.04	82.25	1.33
SF30-M	75.28	1.21	122.2	1.97	59.03	0.98
PF40-M	32.27	0.52	108.9	1.76	68.00	1.10
SF40-M	45.86	0.74	85.98	1.39	59.15	0.95

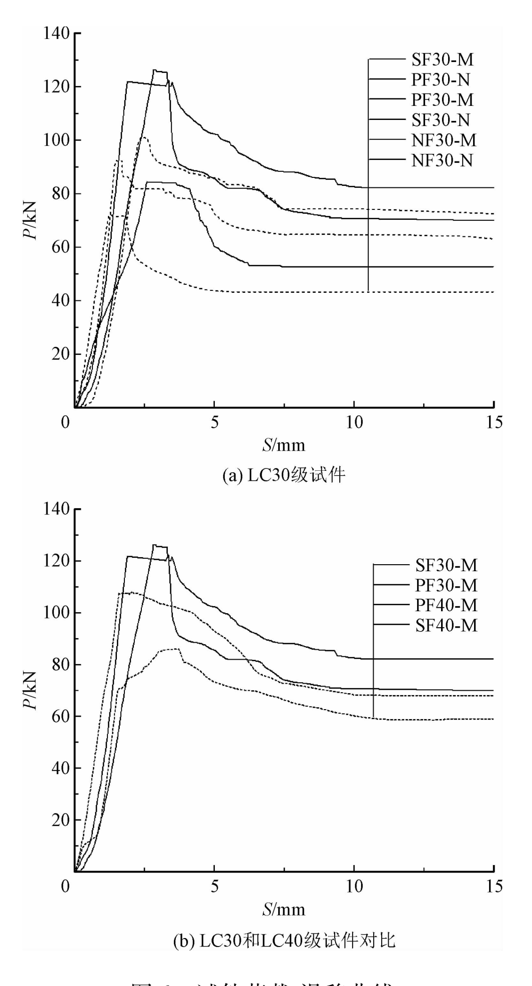


图 6　试件荷载-滑移曲线

Fig. 6　Load-slip curve of specimen

2.3　MPC 的应用对界面滑移机理的影响

型钢与混凝土之间的黏结机理和钢筋与混凝土的黏结机理相似，但将 MPC 作为黏结剂应用于界面上时会使界面化学和物理黏结性能发生改变。随着轴向力的增加，型钢产生横向变形使黏结界面处的混凝土晶体被剪断，化学胶结力逐渐丧失。当 MPC 应用于黏结界面后会与界面处未水化的熟料颗粒反应生成胶凝性更强的水化产物，使界面处晶体不易破坏，形成致密紧凑型黏结界面，增强了混凝土对型钢的约束作用[11]。随着界面处黏结混凝土层的破坏，混凝土在约束型钢时会产生横向压应力并且提高了界面摩擦系数，界面处的黏结应力等于压应力和界面摩擦系数的乘积。但 MPC 在养护硬化过程中存在微膨胀现象，即黏结界面在混凝土层破坏前就会因 MPC 的作用而产生横向压应力，使受力初期界面就存在化学胶结力和摩擦阻力[8]。

3　能量角度分析界面黏结性能

3.1　黏结能量指标定义

冷弯薄壁型钢与纤维轻骨料混凝土间黏结破坏的实质是界面耗能的宏观体现，能量耗散的程度也是界面损伤发展与累计的间接反映[12]。由于加载过程中，任意时刻的界面黏结能量为弹性变形能与耗散能之和。如图 7 所示，本研究以 A_u 表示弹性变形能，即黏结强度达到峰值时荷载滑移曲线与坐标轴围成的面积，此过程中基体硬化过程大于软化过程，黏结界面吸收的能量占主导地位；以 A_r 表示界面黏结能量的耗散，即试件荷载滑移曲线与坐标轴围成的面积，此过程中界面能量不断耗散使界面内能不断减小。为了更直观的量化试件界面的耗能能力，本研究引入黏结能量因子 φ，表 4 列出了各试件的黏结能量指标。φ 的表达式为



$$\varphi = A_r / A_u \qquad (1)$$

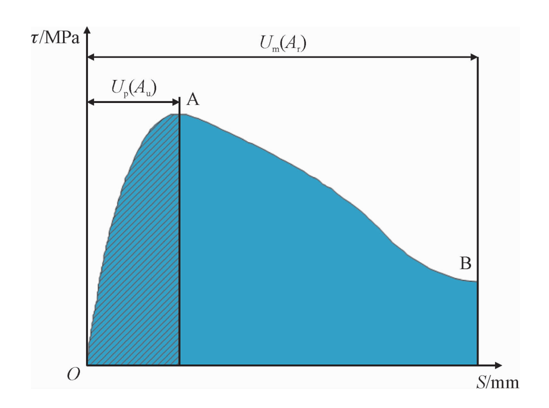


图 7　界面能量吸收与耗散的关系

Fig. 7　Interfacial energy absorption and dissipation

表 4 试件黏结能量指标

Tab. 4 Bond energy index of specimen

试件编号	A_u/(kN·mm)	A_r/(kN·mm)	φ
NF30-N	45.64	672.31	14.73
PF30-N	93.64	1076.53	11.50
SF30-N	69.28	989.37	14.28
NF30-M	104.08	823.00	7.91
PF30-M	140.08	1 091.36	7.79
SF30-M	263.56	1 300.75	4.94
PF40-M	164.47	1 148.07	6.98
SF40-M	160.88	920.86	5.72

3.2 黏结能量指标分析

对于试件 NF30-N 而言，当试件掺入塑钢纤维和钢纤维后，其弹性变形能将增加 105.17% 和 51.80%，耗散能将增加 60.12% 和 47.16%。对于试件 NF30-M 而言，当试件掺入塑钢纤维和钢纤维后，其弹性变形能将增加 34.59% 和 153.23%，耗散能将增加 32.61% 和 58.05%。由于塑钢纤维轻骨料混凝土的基体软化能力较强，故试件掺有塑钢纤维时，其耗散能的提高幅度较大。通过对比可以发现，MPC 作为界面黏结剂对试件黏结能量指标的提高幅度要大于纤维的作用，其中对弹性变形能的提高幅度更明显。

当混凝土强度提高到 LC40 级时，试件 PF40-M 和 SF40-M 的各项黏结能量指标没有过多增长，甚至部分指标存在下降情况，该现象与众多学者研究发现的型钢与混凝土界面黏结性能会随混凝土强度提高而增长的结论相悖。为此，本研究根据现有研究进行分析，发现造成此现象的原因可能是：本试验所用 LC30 和 LC40 级混凝土的水胶比均为 0.4，混凝土强度的提高是通过胶砂比和砂率的改变来完成的，故 LC40 级混凝土会因配合比设计和页岩陶粒的内养护作用导致混凝土内部含水量增加。由于 MPC 的水稳定性较差，当界面含水量较多时其黏结性能会降低[13]。

黏结能量因子 φ 可反映弹性变形能与耗散能的占比关系，通过表 4 可以发现当 MPC 应用在两种材料的黏结界面时，试件的黏结能量因子 φ 会降低 32.26% ~65.41%，代表了界面黏结能量的吸收能力大幅增强，可使冷弯薄壁型钢的冷弯效应得到充分发挥，这对冷弯薄壁型钢-轻骨料混凝土组合结构的受力性能有利。

3.3 界面黏结损伤分析

在荷载作用下，冷弯薄壁型钢与轻骨料混凝土组合结构会产生界面损伤，随着界面损伤的不断发展使界面黏结性能发生退化。因此，本研究利用割线抗滑移刚度去定义试件的损伤度 D_k，以分析试件在荷载作用下界面黏结性能的退化规律。根据图 8 可知损伤度 D_k 的公式为

$$D_k = 1 - K_i / K_0 \tag{2}$$

式中：K_0 为初始割线抗滑移刚度；K_i 为弹性阶段后任意时刻的割线抗滑移刚度。

用图 8 中曲线上任一点与残余黏结承载力 P_r 在弹性阶段对应点的连线斜率表示损伤度。型钢与混凝土界面黏结存在初始缺陷，故 $D_k = 0$ 时表示界面处于初始损伤状态，$D_k = 1$ 时表示界面黏结仅依靠滑动摩擦力维持，此时界面达到完全损伤状态。

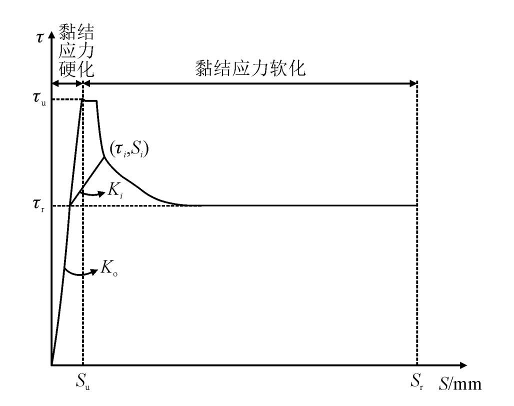


图 8 损伤度的定义

Fig. 8 Definition of damage

图 9 给出了各试件的损伤度 D_k 随界面滑移发展的变化趋势，根据分析可以发现如下规律。

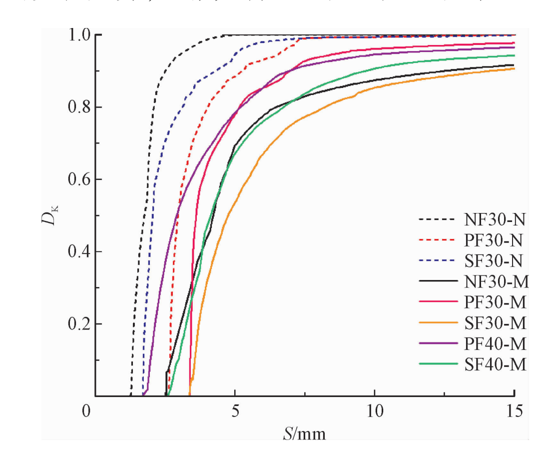


图 9 $D_k - S$ 损伤曲线

Fig. 9 $D_k - S$ damage curve

1) 当界面滑移发展至接近峰值荷载所对应的滑移值时，各试件才开始出现界面损伤。当滑移为 3 mm时，试件 NF30-N 的损伤度已达 0.944，而试件 PF30-N 和 SF30-N 的损伤度仅为 0.528、0.774，表明了界面在掺入纤维后，早期界面的损伤发展速度降低，这是因为纤维的桥接和握裹作用在加载前期会得到充分发挥，延缓了界面的相对滑动所致。但对于试件 PF30-M 而言，塑钢纤维的掺入却使界面抵抗损伤的能力变弱。

2) 当损伤度达到 0.7 时，可认为界面进入破坏状态[14]，通过对比分析可以发现 MPC 的应用使试件达到破坏状态的速度大幅延缓，并对加载全过程的损伤发展都起到了抑制作用，这是因为 MPC 的应用可使界面能够储存更多的弹性变形能，使界面损伤的累积减少所致。同时，对于界面涂抹 MPC 的试件而言，其在加载后期的损伤度均未达到 1，这表明了界面滑移值为 15 mm 时，界面还未达到完全损伤状态。对于混凝土强度为 LC40 级的试件而言，其界面抵抗损伤的能力弱于 LC30 级的试件，此现象与 2.2 节的试验现象吻合。

4　结　论

1) 冷弯薄壁型钢与轻骨料混凝土间的化学胶结力较小使两种材料在加载初期即产生相对滑移。纤维的掺入会抑制混凝土裂缝的贯通，在加载结束后发现：界面涂抹 MPC 后型钢腹板被推出的部分会裹挟有大量混凝土，翼缘表面摩擦痕迹明显。

2) 试件的开裂荷载、峰值荷载和残余承载力均会随纤维的掺入而增加，其中塑钢纤维对试件黏结承载力的提升幅度更高。黏结界面涂抹 MPC 后，黏结承载力会进一步提高，荷载-滑移曲线对应的屈服平台变得更明显，MPC 作为界面黏结剂应用在 LC30 级轻骨料混凝土和钢纤维轻骨料混凝土中会取得更好的效果。

3) MPC 的应用对试件黏结能量指标的提高幅度要大于纤维的作用，其中对弹性变形能的提高幅度更为明显，界面黏结能量吸收能力会大幅增强，可使冷弯薄壁型钢的冷弯效应得到充分发挥。

4) 纤维的桥接和握裹作用在加载前期会得到充分发挥，界面的相对滑动受到限制使早期界面的损伤发展速度降低。MPC 的应用可使试件达到破坏状态的速度大幅延缓，并对加载全过程的损伤发展都起到了抑制作用。

参考文献：

[1] GE H B, USAMI T. Strength analysis of concrete-filled thin-walled steel box columns[J]. Journal of constructional steel research, 1994, 30(3): 259-281.

[2] 郑山锁，邓国专，杨勇，等. 型钢混凝土结构黏结滑移性能试验研究[J]. 工程力学，2003, 20(5): 63-69.
ZHENG Shansuo, DENG Guozhuan, YANG Yong, et al. Experimental study of bond-slip performance between steel and concrete in SRC structures[J]. Engineering mechanics, 2003, 20(5): 63-69 (in Chinese).

[3] 赵根田，刘建华. 冷弯薄壁 C 型钢-轻骨料混凝土组合梁试验研究[J]. 内蒙古科技大学学报，2010, 29(3): 267-271.
ZHAO Gentian, LIU Jianhua. Experimental studies of cold-formed thin-wall C-section steel-lightweight aggregate concrete composite beam[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2010, 29(3): 267-271 (in Chinese).

[4] 孟芹，廖梓珺，李云涛. 磷酸镁水泥的研究现状及发展趋势[J]. 硅酸盐通报，2017, 36(4): 1245-1253.
MENG Qin, LIAO Zijun, LI Yuntao. Research status and development trend of magnesium phosphate cement[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2017, 36(4): 1245-1253 (in Chinese).

[5] 李悦，苏迎秋，梅期威，等. 磷酸镁水泥(MPC)及其作为 FRP 黏结剂的研究进展[J]. 硅酸盐通报，2019, 38(3): 659-663.
LI Yue, SU Yingqiu, MEI Qiwei, et al. Research progress of magnesium phosphate cement (MPC) and its application as FRP binder[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2019, 38(3): 659-663 (in Chinese).

[6] 杨海艳. Q235 钢表面磷酸镁水泥防腐涂层的制备及改性研究[D]. 成都：西南交通大学，2018.

[7] 杨勇. 型钢混凝土黏结滑移基本理论及应用研究[D]. 西安：西安建筑科技大学，2003.

[8] 范英儒. 磷酸镁水泥基材料的修补黏结性能研究[D]. 重庆：重庆大学，2016.

[9] 孙伟. 钢纤维高强混凝土宏观力学性能与微观机理的研究[J]. 上海建材学院学报，1993, 6(2): 131-140.
SUN Wei. The study of the macromechanical performance and micromechanism on steel fiber reinforced high strength concrete[J].

Journal of Shanghai Institute of Building Materials, 1993, 6(2): 131-140(in Chinese).

[10] 孙佳龙,黄煜镔,范英儒,等. 磷酸镁水泥用作道路的快速修补材料研究[J]. 功能材料,2018,49(1):1040-1043.

SUN Jialong, HUANG Yubin, FAN Yingru, et al. Magnesium phosphate cement as rapid road repair material[J]. Journal of functional materials, 2018, 49(1): 1040-1043(in Chinese).

[11] YOU C, QIAN J S, QIN J H, et al. Effect of early hydration temperature on hydration product and strength development of magnesium phosphate cement (MPC)[J]. Cement and concrete research, 2015, 78: 179-189.

[12] 伍凯,陈峰,徐方媛,等. 型钢与钢纤维混凝土界面黏结性能及损伤耗能试验研究[J]. 土木工程学报,2019,52(3):1-11.

WU Kai, CHEN Feng, XU Fangyuan, et al. Experimental study on interfacial bonding property and energy dissipation capacity between shape steel and steel fiber reinforced concrete[J]. China civil engineering journal, 2019, 52(3): 1-11(in Chinese).

[13] 冯璐. 磷酸镁水泥砂浆与钢纤维黏结性能试验研究[D]. 郑州:郑州大学,2018.

[14] 伍凯,徐佳楠,陈峰,等. 型钢-钢纤维混凝土黏结性能及界面损伤分析[J]. 建筑材料学报,2020,23(3):572-580.

WU Kai, XU Jianan, CHEN Feng, et al. Bond performance and interface damage analysis of shape steel and steel fiber reinforced concrete[J]. Journal of building materials, 2020, 23(3): 572-580 (in Chinese).

(编辑 李坤璐)

